

Mikko Kouri

Eristäminen pintojen avulla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennusinsinööri

Insinööriyö

27.4.2015

Tekijä(t) Otsikko	Mikko Kouri Eristäminen pintojen avulla
Sivumäärä Aika	33 sivua + 1 liitettä 27.4.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennusinsinööri
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennesuunnittelu
Ohjaaja(t)	Yliopettaja Hannu Hakkarainen Toimitusjohtaja RI Ossi Pirinen
<p>Tässä insinöörityössä tarkasteltiin uudenlaista tapaa eristää rakennuksia. Lähtökohtana työlle oli rakennuksen vaipalle asetetut kiristyvät U-arvo vaatimukset sekä rakentajien ohjaaminen valitsemaan nolla- tai plusenergiatalon suunnittelun lähtökohdaksi. Markkinoille täytyisi kehittää uudenlainen kustannustehokas eristystapa, jotta halu toteuttaa projekteja näistä lähtökohdista yleistyisi. Tällä hetkellä markkinoilta ei löydy tuotetta, joka eristysominaisuuksiltaan pystyisi kilpailemaan perinteisten eristysmateriaalien kanssa aiheuttamatta suurta lovea rakentajan lompakkoon.</p> <p>Työssä lähdettiin tutkimaan uusia eristysmateriaaleja ja niiden ominaisuuksia. Selvästi ylivoimaiseksi eristysarvoltaan asettui tyhjiöeristeet, joissa yhdistyy säteilyn ja lämmönjohtavuuden estävät ominaisuudet.</p> <p>Kun tyhjiöeristepaneelin ominaisuuksia lähdettiin tarkemmin tutkimaan, huomattiin sillä olevan tietynlainen kuori ja sisäinen rakenne. Kuorikerroksella on käytännössä kaksi tarkoitusta: Se estää ulkoisen paineen tasoittumisen sisäisen alipaineen kanssa ja toisaalta heijastaa säteilyä pois rakenteesta. Sisäinen nanopartikkelirakenne taas estää kuoren sisään painumisen ulkoisen paineen vaikutuksesta. Kuitenkin nanopartikkeleiden valmistus on erittäin työlästä, joka aiheuttaa eristeelle erittäin kalliin hinnan. Tyhjiöeristeitä on tutkittu erittäin paljon ja niissä on todettu hinnan lisäksi myös kaksi suurta ongelmaa; paneelien reuna-alueen U-arvo ja tyhjiön pysymättömyys, joka tarkoittaa sen eristysominaisuuksien huomattavaa heikkenemistä kun ulkoinen ja sisäinen paine ajan myötä väistämättä taasaantuu.</p> <p>Tyhjiöeristettä lähdettiin rakentamaan uudesta näkökulmasta ja ratkaistavana oli siis kolme ongelmaa. Eristeen tuli olla kustannustehokas, reuna-alueet oli minimoitava ja eristysominaisuus oli saatava pysyväksi. Lopputuloksena saatiin teoriassa toimiva järjestelmä. Kuitenkin järjestelmä vaatii vielä paljon tutkimus- ja kehitystyötä, jotta siitä saataisiin kehitettyä mahdollisimman kustannustehokas vaihtoehto rakentajille.</p>	
Avainsanat	Tyhjiö, eriste

Author(s) Title	Mikko Kouri Insulating with Two Surfaces
Number of Pages Date	33 pages + 1 appendix 27 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineer
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Hannu Hakkarainen Principle Lecturer Ossi Pirinen CEO
<p>This thesis studies a new way of insulating buildings. The starting point for this study was the tightening requirements for the u-values of building envelopes and directing builders and designers to choose zero- or plus-energy buildings as a starting point to the project planning. For this the market requires a new cost-effective way of insulating buildings. At the moment there is no product on the market that could compete with traditional ways of insulating buildings without considerably increasing the cost of the entire project.</p> <p>The study started by investigating new insulation materials and their properties. Clearly the product with the most effective abilities to prevent heat leakage was vacuum insulation.</p> <p>When the properties of vacuum insulation were studied it was revealed that the insulation itself had a certain type of inner and outer structure. The outer structure had two purposes, one to prevent the outer pressure from stabilizing with the inner pressure and two to block heat energy from penetrating the structure by radiation. The inner structure which consists of nanoparticles prevents the outer structure from collapsing inside due to the outer pressure. However, the manufacturing of these nanoparticles is very difficult and requires special conditions which also makes the whole insulation very expensive. Vacuum insulations are very much studied and in addition to the cost the product they also have two other major problems. The ability to insulate in the edges of the insulation and the fact that the panel loses most of its insulating properties when the inner- and outer pressure inevitably stabilizes in a certain amount of time.</p> <p>So the vacuum insulation was approached from a different point of view and there were three major issues to solve. The insulation had to be cost-effective, the edges had to be minimized and the ability to insulate had to become permanent. As a result there was a good theory of how to build a functioning system that meets all these requirements. But even so the system still needs a great amount of studies and development before it can be alluring enough for builders and designers to choose it before the traditional insulations.</p>	
Keywords	Vacuum, insulation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Omia ajatuksia rakennusalasta	2
3	Rakennusten vaipalle asetetut vaatimukset	3
3.1	Vaatimukset rakenteiden lämmönjohtavuudelle	3
3.2	Vaatimukset rakenteen tiiveydelle	4
4	Nykyiset eristemateriaalit	4
4.1	Perinteiset eristemateriaalit	4
4.2	Uudempia eristemateriaaleja	5
5	Eistäminen pintojen avulla	7
5.1	Eistysjärjestelmä	7
5.2	Eisteen sisäinen konvektio	8
5.3	Rakenteelle asetettavia vaatimuksia	9
5.3.1	Tukirakenteet	10
5.3.2	Rakenteen puristuslujuuden suhde eristävyyteen	12
5.3.3	Levy rakenne	14
5.3.4	Levyn pinnoitus ja sauma	15
5.4	Järjestelmä	15
6	Kustannustehokkuus	18
6.1	Eri rakennusmateriaalien kustannukset	19
6.1.1	Perinteiset eristemateriaalit	19
7	Rakenteen koestus	20
7.1	Koestuksen järjestely	20
7.2	Koestuksen tavoite	20
7.3	Rakenne	20
7.4	Koejärjestely ja päätelmät	22
7.5	Johtopäätöksen koestuksesta	25
7.5.1	Eisteen sisäinen runkorakenne	25
7.5.2	Pinnoitus	25

8	Päätelmät	26
8.1	Levyrakenne	26
8.2	Tuet	26
8.3	Pinnoitus	26
8.4	Järjestelmä	27
9	Tarvittavat suunnitelmat	29
9.1	Rakennesuunnitelmat	29
9.2	LVI-suunnitelmat	29
9.3	Valmistusohjeet	29
9.4	Asennusohjeet	29
9.5	Huoltosuunnitelma	30
10	Johtopäätökset	30
	Lähteet	33

LIITTEET

Sandwich-elementtirakenteet

1 Johdanto

Hiilidioksidipäästöjä tullaan nyt ja lähitulevaisuudessa vähentämään huomattavasti. Rakennusten ja rakennusteollisuuden osuus koko maailman energiankulutuksesta sekä hiilidioksidipäästöistä on noin 40 %. Tämä osuus koostuu suurimmaksi osaksi rakennusmateriaalien valmistuksesta ja rakennusten kuluttamasta energiasta. Näihin asioihin vaikuttamalla saadaan hiilidioksidipäästöjä vähennettyä tehokkaimmin. Uusiutuvat energialähteet, talotekniikka, rakenteiden eristävyys, rakennusmateriaalien valinta, valmistustavat ja kierrätys ovat keinoja, joilla pystytään tehokkaimmin vaikuttamaan hiilidioksidipäästöihin.

Tässä työssä on tarkoitus tutkia uutta tapaa eristää rakennuksia ja vähentää rakennusten energiankulutusta sekä hiilidioksidipäästöjä koko elinkaaren ajan valmistuksesta käyttöön ja lopulta purkuun. Työtä tehdään suurimmaksi osaksi internet- ja kirjallisuuslähteiden avulla. Rakenteille suoritetaan myös rasisuskokeita, joissa varmistetaan rakenteen toiminta myös käytännön tasolla.

Tavoitteena on luoda uusi kustannustehokas tapa eristää passiivi-, nolla- ja plusenergian luokkaisia rakennuksia ja samalla pyrkiä vaikuttamaan osaan yllä mainituista asioista.

2 Omia ajatuksia rakennusala

Tulevaisuudessa rakennusten päästövaatimukset tulevat yhä kasvamaan, kun pyritään nollaenergiarakentamiseen. Tämä tarkoittaa, että rakennusten tulisi tulevaisuudessa joko tuottaa yhtä paljon tai enemmän energiaa kuin ne kuluttavat. Näihin tavoitteisiin pääseminen voi kuitenkin olla erittäin vaikeaa. Rakennus- ja energia-alalla toimii erittäin suuria yrityksiä, jotka eivät lyhyellä aikavälillä millään tavoin hyödy tällaisesta kehityssuunnasta.

Tälläkin hetkellä on jo olemassa rakennuksia, joissa tuotto vuotuisella tasolla on suurempaa kuin rakennuksen kuluttama energia. Ongelmana on energian varastointi. Jotta rakennus voisi tällä hetkellä hyödyntää kaiken tuottamansa energian, tulisi olla suuret paikalliset sähkövarastot.

Energiatuottajat ja jakelijat tulisikin saada kiinnostuneiksi sähköverkkojensa kehittämisestä. Sähköverkon tulisi tulevaisuudessa toimia joustavasti kahteen suuntaan, jotta rakennukset voisivat tuottaa sähköä verkkoon silloin kun se on mahdollista ja myös vastineeksi käyttämään sitä silloin kun energialähteitä on huonosti käytettävissä. Esi-merkkinä päiväsaikaan kesällä aurinkoenergiaa on hyvin tarjolla, mutta myös yöllä ja talviaikaan rakennuksen tulisi pystyä tuottamaan lämpöä. Sähköautojen kannan kasvamiseen voitaisiin myös vaikuttaa, jos sähkö voitaisiin tuottaa paikallisesti uusiutuvia energialähteitä hyväksikäyttäen. Tällainen kehityssuunta ei lyhytnäköisesti tietenkään palvele energiateollisuutta, joka on myös vastuussa sähkön jakelusta.

Suuryritykset eivät tule vapaaehtoisesti luopumaan tuotoistaan. Tähän kehityssuuntaan onkin erittäin vaikea suunnata ilman valtion säätelyä tai uusia ja vanhoja toimijoita, jotka hyötyisivät siitä, että voisivat tarjota asiakkailleen halvemman ja kestävämmän tavon tuottaa energiaa ja rakentaa rakennuksia.

3 Rakennuksen vaipalle asetetut vaatimukset

3.1 Vaatimukset rakenteiden lämmönjohtavuudelle

Energian siirtymistä rakenteen läpi tilasta toiseen merkitään rakenteen U-arvolla. U-arvo lasketaan käyttämällä materiaaleille määritettyä λ (lambda) -arvoa. Tämä arvo tarkoittaa materiaalin lämmönläpäisevyysskykyä. Mitä pienempi materiaalin lambda-arvo on, sitä huonommin materiaali johtaa lämpöä eli käytännössä eristää.

Rakenteella on myös aina huomioitava pintavastukset kummallakin puolella rakennetta. Nämä pintavastukset lisätään ainoastaan yhden kerran koko rakenteelle huolimatta siitä kuinka monta eri materiaalikerrosta rakenteessa on. Pintavastuksen suuruus on riippuvainen rakenteen sijainnista vallitsevaan ilmastoon nähden. Mitä suojaisammassa tilassa rakenne on sitä suurempi pintavastus sillä on.

3.1. Rakennuksen eri osien nykyiset U-arvovaatimukset

Yläpohja = $0,09 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$

Ulkoseinä = $0,17 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$

Alapohja = $0,16 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$

Ikkunat = $1,0 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$

Ovet = $1,0 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$.

[8.]

Nämä U-arvovaatimukset ovat kasvattaneet perinteisten eristeratkaisujen eristepaksuuksia suuriksi. Tämä on aiheuttanut myös tarpeetonta rakennepaksuuksien kasvamista. Rakenteiden paksuuden tulisi ensisijaisesti määräytyä rakenteiden kantavuuden ja säilyvyyden mukaan. Kaikki tämän yli menevä voidaan käytännössä luokitella tarpeettomaksi materiaaliksi rakenteessa. Tämä tarkoittaa yksittäisen rakentajan kannalta

ylimääräisiä kuluja ja globaalilla tasolla ylimääräisiä materiaalien valmistuksesta aiheutuvia päästöjä.

3.2 Vaatimukset rakenteen tiiveydelle

Ilman rakennusten hyvää tiiveyttä ei materiaalien eristyskykyä pystytä käyttämään hyväksi, koska ilmavuotojen mukana siirtyvä lämpöenergia on liian suurta. Rakennukselle voidaan määrittää ilmanvuotoluku (n) joko mittaamalla tai käyttämällä minimiarvoa $n=4$ 1/h. Luku tarkoittaa sitä kuinka monta kertaa tunnissa rakennuksen tilavuuden verran ilmaa vaihtuu 50 Pascalin paine-erolla ulkopuoliseen paineeseen verrattuna.

4 Nykyiset eristemateriaalit

4.1 Perinteiset eristemateriaalit

Otetaan esimerkkinä yleisimmin käytetyt ja tällä hetkellä edullisimmat hinta verrattuna eristävyys suhteeltaan mineraalivilla, ekovilla ja EPS Lattia eristeet, joiden λ -arvot = 0,037 W/(m*K) (mineraalivilla), 0,039 W/(m*K) (ekovilla yläpohjassa) ja 0,036 W/(m*K) (EPS 100 Lattia).

Ekovillaa käytetään yleisimmin puhallusvillana yläpohjien ja seinien eristämiseen, mineraalivillaa on yleisimmin käytetty ulkoseinien eristeinä ja EPS-eristeitä yleisimmin alapohja- ja routaeristeinä. Näillä eristeillä eristekerroksen paksuudeksi saadaan vähimmäisvaatimuksilla yläpohjassa 450 mm, seinissä 250 mm ja alapohjassa 200 mm. Alapohjassa ja routaeristeinä on myös käytetty yleisesti Finnfoam-eristeitä niiden suuren puristuslujuuden vuoksi.



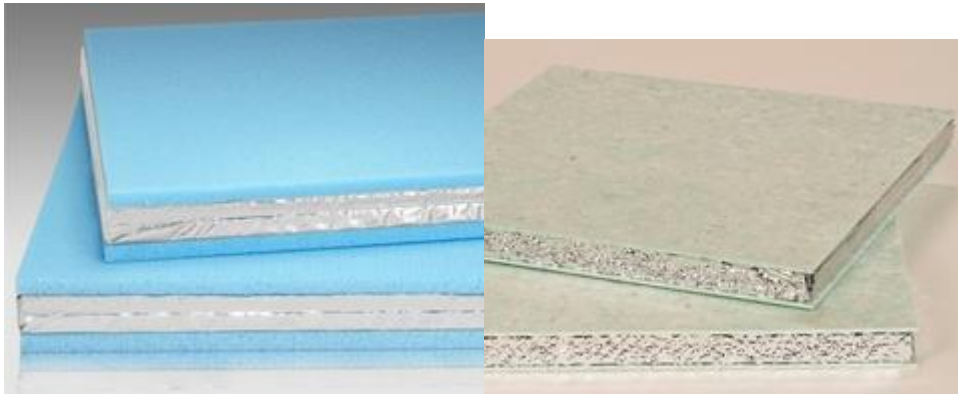
Kuva 1. Mineraalivilla, ekovillalevy ja EPS-eriste [9, 10, 11]

4.2 Uudempia eristemateriaaleja

Rakennepaksuuksia onkin jo pyritty pienentämään kehittämällä uusia erittäin hyvin eristäviä materiaaleja. Tällaisia eristeitä ovat mm. aerogel, SPU-eristeet ja tyhjiöeristeet. Näillä eristeillä saadaankin U-arvovaatimukset täytettyä huomattavasti ohuemmilla eristepaksuuksilla. Nämä eristeet eivät kuitenkaan ole kustannustehokkaita ratkaisuja rakennuksen pääsääntöisenä eristysenä niiden kustannusten vuoksi. Näitä eristeitä onkin useammin käytetty esimerkiksi korjauskohteissa, joissa on ehdottomasti päästävä ohuempiin rakennepaksuuksiin.

Edellä mainituista eristeistä vähiten lämpöä johtavat tyhjiöeristeet, joiden λ -arvo on parhaimmillaan 10 °C lämpötilassa jopa 0,0043 W/mK. Tämä tarkoittaa esim. yläpohjassa ainoastaan 50mm eristepaksuutta. Nykyisille tyhjiöeristeille käytetään kuitenkin suurempaa (0,008 W/mK) suunnittelussa käytettävää mitoitusarvoa. Tyhjiöeristeet myös menettävät eristyskykyään ajan myötä.

Tämä onkin heti hinnan jälkeen nykyisten tyhjiöeristeiden suurin ongelma. Asennuksen jälkeen tyhjiötä ei voida enää huoltaa muuten kuin vaihtamalla se uuteen paneeliin. Toinen suuri ongelma on se, ettei eristeitä voi myöskään enää muokata työmaalla puhkaisematta tyhjiötä.



Kuva 2. Tyhjiöeristepaneeleita erilaisilla pinnoitteilla [12]

Aerogel-eristeet ovat hyviä silloin kun halutaan esimerkiksi katkaista kylmäsiltoja rakennneosien välillä tai tiivistää rakenteiden saumoja/rakoja. Eriste on helposti muokattava ja erittäin hyvin eristävä. Tämänkään eristeen hinta ei kuitenkaan pysty millään tavoin kilpailemaan perinteisten eristysmenetelmien kanssa.



Kuva 3. Aerogel [13.]

SPU-eristeillä on muutama parempi ominaisuus kuin useilla muilla eristeillä. Ilma on korvattu ponnekaasulla, jolla on huomattavasti ilmaa parempi kyky eristää lämmön siirtymistä. Eristeessä on umpisolurakenne, joka estää kaasun kiertämisen eristeen sisällä. Lisäksi eristeessä on alumiinipinnoite, joka estää tehokkaasti lämmön johtumisen eristeen läpi myös säteilemällä.

Näiden ominaisuuksien vuoksi SPU-eristeillä päästään lambda-arvoon 0,023 W/mK. SPU-eristeiden hinta on kuitenkin myös moninkertainen perinteisiin eristysmateriaaleihin verrattuna. Kuitenkin huomattavasti parempi eristyskyky ja eristeellä saavutettava

tiivimpi rakenne tekee siitä hyvän vaihtoehdon tietyissä tilanteissa. SPU-eristeestäkin on tehty versio, jossa kahden levyn välissä on käytetty tyhjiöeristettä. Tässäkin eristeessä on valitettavasti samat ongelmat kuin muissa nykyisissä tyhjiöeristeissä.



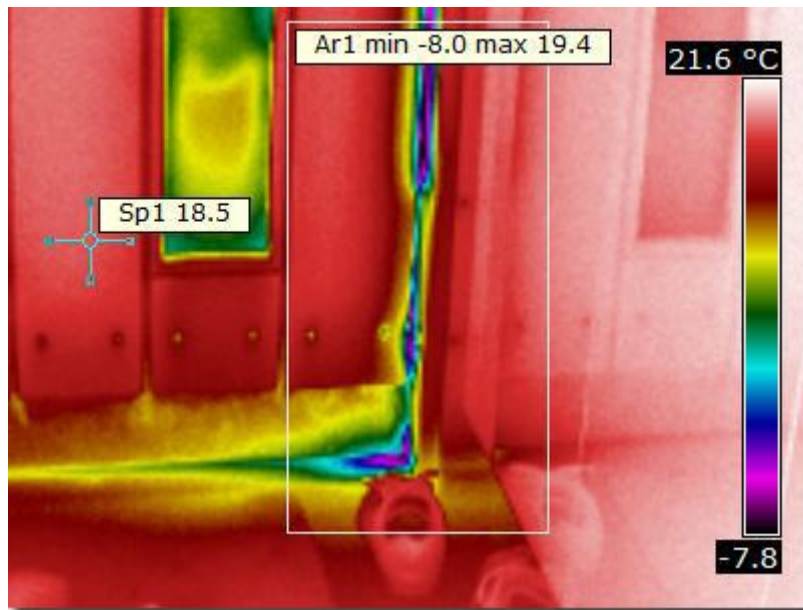
Kuva 4. SPU AL ja SPU XT -levyt [17]

5 Eristäminen pintojen avulla

5.1 Eristysjärjestelmä

Tarkoituksena on kehittää rakenteen sisään jäävä mahdollisimman tiivis tila, jossa ulkopuoliset kaasut eivät pääse siirtymään eristyskerroksen sisäpuolelle. Rakennuksia onkin lähes mahdotonta saada täysin ilmatiiviiksi. Tämä on ymmärrettävää, koska vähintäänkin aukaistavien osien kuten ovien ja ikkunoiden liitoskohdista pääsee aina jonkin verran ilmaa vuotamaan läpi. Kuitenkin esimerkiksi elementtien sauma-alueilla ja eri rakennusmateriaalien liitoskohdissa esiintyy usein sama ongelma. Näihin ongelmiin tulisi ehdottomasti puuttua tarkemmin jo suunnitteluvaiheessa.

Ainoa tapa rakentaa rakennus täysin tiiviiksi on asettaa sen tiiveys pakolliseksi tavoitteeksi. Tällöin rakennuksen suunnittelu- ja rakennusvaiheessa joudutaan keskittymään näihin asioihin tarkemmin. Vaikka seinä olisi kuinka hyvin eristävä ei siitä saada todellista hyötyä irti, jos rakenteen tiiveydessä menetetään kaikki rakenteen eristävyydellä saavutettu hyöty.

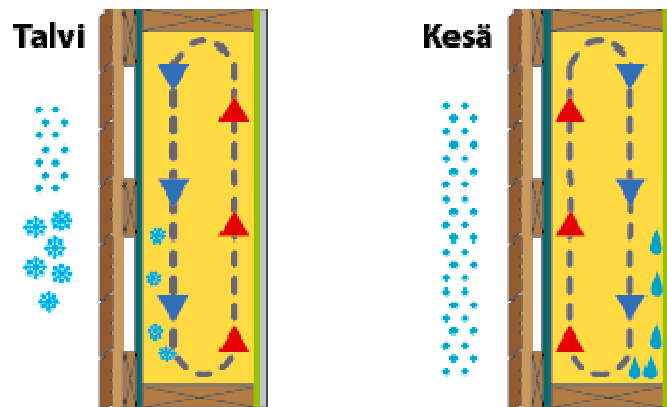


Kuva 5. Lämpökameran kuvaa rakennuksen saumakohdasta [14]

Kehitettävän järjestelmän tulisi toimia yhtenäisenä vaippana rakennuksen ympärillä, siten, ettei rakenteeseen muodostu selviä epäjatkuvuuskohtia. Ovien kohdalla tämä on todennäköisesti lähes mahdotonta toteuttaa, koska ovien on luonnollisesti aina auettava. Ovien ja ikkunoiden eristyskyvyn parantamista tulisi kuitenkin myös ehdottomasti tarkastella. Ikkunat voisi helposti yhdistää eristysjärjestelmään, koska ilmanvaihdon toimiessa halutulla tavalla ei pitäisi ikkunoiden avaamiselle olla tarvetta. Rakennuksen tiiveys onkin keskeisessä osassa siinä kuinka hyvin rakennuksen ilmanvaihto toimii.

5.2 Eristeen sisäinen konvektio

Ilma itsessään on erittäin hyvä eristysmateriaali ja suurin osa nykyisin käytössä olevista eristeistä käyttävätkin ilman tai jonkin muun kaasun eristävää vaikutusta hyväkseen. Lämpimämpi kaasu kuitenkin pyrkii aina nousemaan ylöspäin, joka aiheuttaa virtausta eristeiden sisällä ja heikentää materiaalin eristyskykyä. Materiaalin tiiveys hidastaa virtausta eristeiden sisällä ja parantaa näin eristyskykyä.



Kuva 6. Konvektio eristeessä [15]

Kun pyritään eristämään kahden eri pinnan avulla ilman itse eristettä, tulee konvektion vaikutus erittäin suureksi. Kaasussa ja nesteessä kulkeutuva lämpö pääsee tällöin kulkeutumaan rakenteen pinnalta toiselle ilman eristeen vastustavaa vaikutusta. Tämä voidaan estää parhaiten poistamalla tilasta kaasu.

Kaasun poistaminen aiheuttaa pintojen väliin puristusta, koska ulkopuolella vallitseva ilmakehän paine pyrkii tasaantumaan rakenteen sisällä vallitsevan paineen kanssa. Kun rakenne on täysin tiivis, paine ei pääse tasaantumaan. Täydellisessä tyhjiössä vallitsee yhden baarin suuruinen paine. Yhden baarin paineessa kohdistuu 10 Newtonin suuruinen voima neliösenttimetrille. 10 Newtonia vastaa noin 1 kg:n painoa. Tämä tarkoittaa, että rakenteen kummallekin pinnalle kohdistuu $10\,000\text{ kg/m}^2$ eli 100 kN/m^2 suuruinen tasainen kuorma.

5.3 Rakenteelle asetettavia vaatimuksia

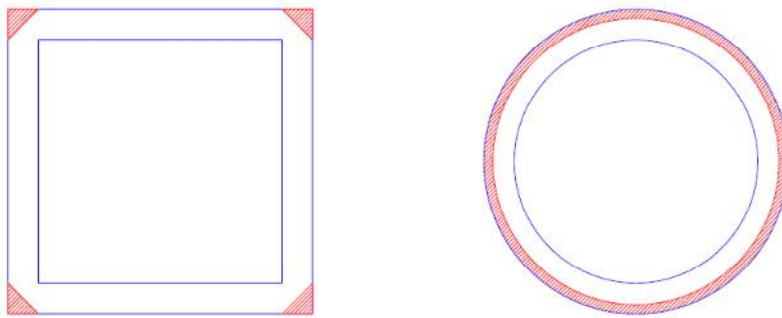
Kaksikerroksinen rakenne takaisi seinärakenteen eristyskyvyn säilymisen ja huoltamisen ilman seinän eristyskyvyn hetkellistä menettämistä. Tämä mahdollistaisi myös eristysjärjestelmän jatkuvuuden vaipan ympäri. Yksikerroksinen järjestelmä olisi todennäköisesti jaettava eri lohkoihin järjestelmän huollettavuuden vuoksi. Huollettavuuden ilman eristyskyvyn täydellistä menetystä voisi myös ratkaista lisäämällä tyhjiökerroksen lisäksi sisä- tai ulkopuolelle rakennetta sekundäärinen eristekerroksen.

Nykyisten tyhjiöeristeiden ongelmat on otettava huomioon. Paneeleita täytyy pystyä muokkaamaan helposti työmaalla vaarantamatta rakenteen tiiveyttä → sauma-alueille

(rakennuksen kulmiin) kehitettävä varma ja toimiva kiinnitystapa tai erillinen saumaelementti.

Ulkoeristyksen kiinnittäminen rakenteeseen ja paneelin kiinnittäminen runkoon on oltava mahdollisimman helppoa joko liimaamalla tai mekaanisesti.

Tukirakenteiden muodon tulisi olla pyöreä tai jatkuva, jotta tuet eivät aiheuttaisi suuria pistemäisiä kuormia tukien reuna-alueille. Tällöin vältetään niin levy kuin tukimateriaaleille tulevat suuret pistekuormat.



Kuva 7. Kuormituksen keskittyminen tuen muodon mukaan

5.3.1 Tukirakenteet

Rakenteessa tulee olla tukirakenteita melko tiheään, jotta itse pinnassa käytettävä levyrakenne voisi olla mahdollisimman kevyt ja täten myös edullinen. Jokainen tuki aiheuttaa rakenteessa eristyskykyä heikentävän rakenneosan, joten tukikohdissa tulisi käyttää materiaalia, jolla on suhteellisen hyvä eristyskyky suhteutettuna materiaalin puristuslujuuteen.

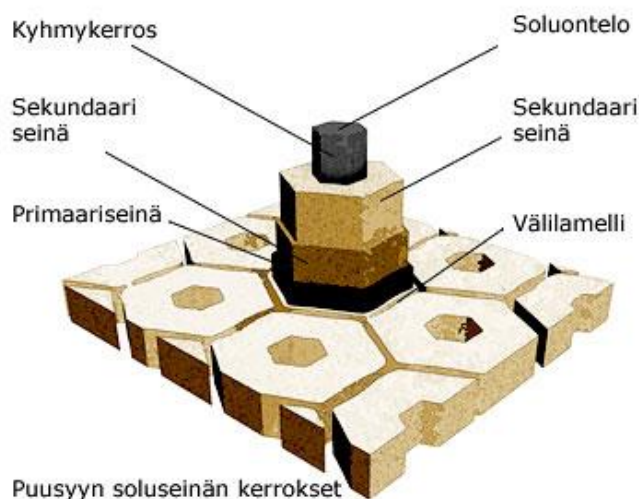
Taulukko 1. Materiaalien lämmönjohtavuuden suhde materiaalin puristuslujuuteen [1, 2, 5]

Materiaalin lamda-arvo/puristuslujuus				
	MALLI	λ -arvo [W/mK]	$f_{c,0,k}$ [N/mm ²]	$\lambda/f_{c,0,k}$
Puu	C18	0,12	18	150
	C24	0,12	21	175
	C30	0,12	23	191,6667
Finnfoam	FI-300	0,035	0,25	7,142857
	FI-400	0,035	0,3	8,571429
	FI-500	0,035	0,4	11,42857
	FI-700	0,035	0,5	14,28571
Teräs	S355J	50	355	7,1
Muovi	PVC, jäykkä	0,2	50	250

Mitä suurempi puristuslujuus materiaalilla on, sitä vähemmän materiaalia tarvitaan pinta-alaltaan. Tämä tarkoittaa myös sitä, että tukimateriaalin aiheuttama pistemäinen kuormitus tuen kohdalla on suurempi eli itse tuki voi leikkautua läpi levyrakenteesta. Tämän vuoksi teräksestä tehdyt tuet voidaankin jo tässä vaiheessa pudottaa pois tarkastelusta.

Taulukosta 1 voidaan todeta, että puu tai jäykkä muovi olisi todennäköisesti paras vaihtoehto tukirakenteeksi, kun mitoitusperusteena käytetään lämmönjohtavuuden ja puristuslujuuden suhdetta.

Tästä ei voi tehdä vielä mitään lopullista päätelmää, koska on myös huomioitava tuen aiheuttama pistekuorma levyrakenteelle sekä esimerkiksi puun ja muovin käyttäytymisen tyhjiössä.



Kuva 7. Puun sisäinen rakenne [16]

Normaaleissa kosteusolosuhteissa soluontelossa oleva vesi antaa puulle paremman halkaisulujuuden. Lämpökäsittelyssä puulle tehdään käytännössä samankaltainen toimenpide kuin tyhjiössä tapahtuu ajan mittaan. Puussa oleva kosteus höyrystetään pois korkeassa lämpötilassa. Tällöin puun kosteuskestävyys kasvaa huomattavasti. Solukko umpeutuu eikä puuhun enää imeydy juurikaan kosteutta. Tällöin puusta tulee tiheämpää, joka parantaa puun puristuslujuutta. Käsittely tekee kuitenkin puusta hauraampaa, jolloin puun halkaisukestävyys pienenee 30 - 40 %. Käsittely myös heikentää puun lämmönjohtavuutta, jolloin puun eristävyys rakenteessa paranee 20 - 25 %. Lämpökäsitelty puu voisi siis olla erittäin hyväkin vaihtoehto tukimateriaaliksi.[4.]

Puu ei kuitenkaan ole materiaalina homogeeninen eli puussa on kohtia, jotka murtuvat helposti kuten oksat. Kun puuta käytetään rakenteessa, jossa heikentävien rakenneosien minimointi on erittäin tärkeää, tulee käyttää vanerimaista rakennetta. Tällöin heikentävät rakenneosat eivät ole koskaan samassa kohdassa levyä tai tukirakennetta.

5.3.2 Rakenteen puristuslujuuden suhde eristävyyteen

Finnfoamin valmistama eriste FI-700 kestää 500 kPa pitkäaikaista kuormaa vain <2 % kokoon puristumalla. Tämä tarkoittaa 500 000 N/m² kestävyyttä puristusta vastaan kun yhden baarin aiheuttama voima on vastaavasti 100 000 N/m². Eristeen lambda-arvo on 0,035 W/mK eli suhteellisen hyvä, jopa verrattuna muihinkin eristeisiin.[3.]

Tätä eristettä tulisi siis käyttää tukirakenteena vähintään 20 % pinta-alasta. Kun tyhjiölle käytetään arvoa 0,008 W/mK (10° lämpötilassa) saadaan 100 mm (20 % FI-700 + 80 % tyhjiö) eristekerroksen U-arvoksi pintavastukset huomioiden $U = 0,0970 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tarkastellaan seuraavaksi pinta-alavaatimusten suhteen optimoituja rakenteen U-arvoja puu- ja muovitukirakenteiselle eristekerrokselle.

Taulukko 2. Eristekerroksen U-arvo puristuslujuuden vaatiman pinta-alan mukaan [4. s.8]

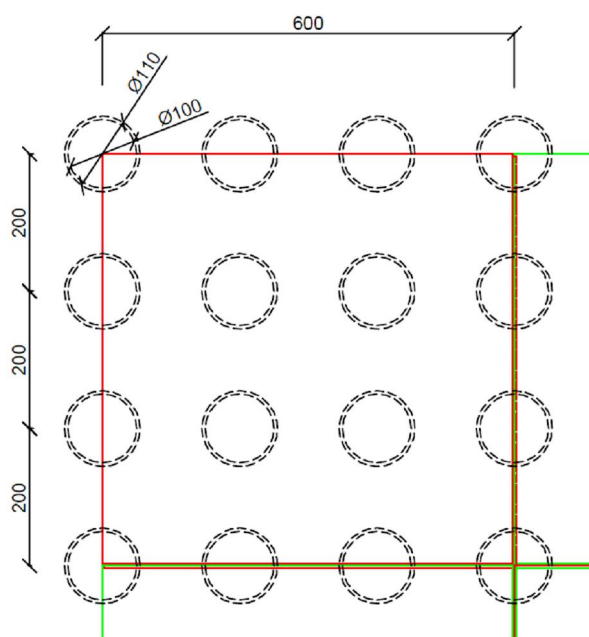
Rakenteiden U-arvot (100mm eristekerros)							
Tyhjiön aiheuttama puristus				Tyhjiön aiheuttama puristus			
Fk =	0,1 N/mm2			Fk =	0,1 N/mm2		
Lämpökäsitelty puu C24				Muovi PVC, jäykkä			
Tukipinta-ala				Tukipinta-ala			
f _{c,0,k,C24}	=	21	N/mm ²	f _{ck, PVC}	=	50	N/mm ²
A _{TUKI}	=	0,003142	m ² /m ²	A _{TUKI}	=	0,003142	m ² /m ²
Tukien lkm. =		25	kpl/m ²	Tukien lkm. =		25	kpl/m ²
A _{VAAD} [%]	=	0,47619	%	A _{VAAD} [%]	=	0,2	%
A _{TOD} [%]	=	7,853982	%	A _{TOD} [%]	=	7,853982	%
b	=	0,1	m	d	=	0,1	m
λ _{PUU, LK}	=	0,12	W/mK	λ _{PVC}	=	0,2	W/mK
R _{PUU}	=	0,003968	m ² K/W	R ₂₀₀	=	0,001	m ² K/W
Tyhjiö				Tyhjiö			
d	=	0,1	m	d	=	0,1	m
λ _{TYHJIÖ}	=	0,008	W/mK	λ _{TYHJIÖ}	=	0,008	W/mK
R _{TYHJIÖ}	=	12,44048	m ² K/W	R _{TYHJIÖ}	=	12,475	m ² K/W
Lämmönvastus (U-arvo)				Lämmönvastus (U-arvo)			
R _{si}	=	0,17	m ² K/W	R _{si}	=	0,17	m ² K/W
R _{se}	=	0,04	m ² K/W	R _{se}	=	0,04	m ² K/W
R _p	=	12,65444	m ² K/W	R _A	=	12,686	m ² K/W
U	=	0,079024	W/m ² K	U	=	0,078827	W/m ² K

Huomataan, että silloin kun tukirakenteella on tarvittava määrä puristuslujuutta, sen vaikutus heikentävästi eristekerroksen U-arvoon on erittäin pieni. Todellinen tukipinnan vaatima pinta-ala tulee todennäköisesti olemaan huomattavasti suurempi kun yllä käytetyt puristuslujuuden suhteen optimoidut pinta-alat, koska mitoittavaksi tekijäksi tulee tukien kiinnityksen ja läpileikkauskestävyyden aiheuttamat vaatimukset.

5.3.3 Levyrakenne

Levyrakenteella tulee olla tarpeeksi lujuutta, jotta se kestää sille tulevan pistemäisen kuorman sekä paineen aiheuttaman taivutusmomentin. Levyrakenne tulee määrittämään myös tukien koon sekä jakoetäisyydet.

Rakenne mitoitetaan levyn läpileikkauksen ja taivutuskestävyyden mukaan. Mitoituksesta saatujen tulosten perusteella tukiväliksi valittu 200 mm, tuen halkaisijaksi 110 mm ja levyrakenteeksi 9 mm paksu havuvaneri. Havuvanerin paino on 480 kg/m^3 eli yhden levyn paino esim. 600 mm x 600 mm moduulissa on 1,56 kg. Levykerroksia 3 kpl, joten yhden moduulin painoksi tulisi tällöin 4,7 kg + tukiosat + pinoite. Sallittuna taipumana rakenteelle käytettiin 1 mm ja maksimitaipumaksi saatiin 0,9 mm, joka on = $L/193$. Läpileikkauksen käyttöasteeksi vanerille saatiin 23 % eli rakenne kestää sille tulevan läpileikkausvoiman erittäin hyvin.[1. s.19.]



Kuva 8. Rakennemalli 1; Tuet 5mm seinämävahvuudella

Nyt kun ensimmäinen rakennemalli on määritetty, voidaan rakenteen U-arvo mitoittaa todellisella tukimateriaalin pinta-alalla. Kun tyhjiön lämmönvastuksen arvona käytetään 0,008 W/mK saadaan rakenteen U-arvoksi $(9+50+9+50+9=127 \text{ mm})$ puulla 0,0848 W/m²K ja muovilla 0,0850 W/m²K (tässä ei huomioitu havuvanereiden vaikutusta).

5.3.4 Levyn pinnoitus ja saumaus

Rakenteen tärkein ominaisuus on sen tiiveys. Ilman tarpeeksi hyvää rakenteen tiiveyttä ei voida päästä kustannustehokkaaseen ratkaisuun. Tyhjiöpumppu käyttää energiaa toimiakseen eikä pitkäaikaisiin säästöihin voida päästä, jos tyhjiötä joudutaan jatkuvasti alipaineistamaan uudestaan. Rakenteen tiiveys vaikuttaa siis suoraan kustannuksiin. Tiiveyteen vaikuttaa eniten levyn pinnoitukseen käytettävä materiaali.

Materiaali ei saa päästää kaasuja vuotamaan sen läpi tai menettää tiiveyttään ajan mittaan. Tyhjiössä materiaalista vapautuu kaasuja tyhjiöön. Tämä voi heikentää pinnoituksen kykyä estää ulkopuolisten kaasujen pääsyä tyhjiökerrokseen ja täten aiheuttaa kustannuksia pumpun ylimääräisestä käytöstä.

Pinnoitteen tulee siis mahdollisimman hyvin eristää kaasuja, kestää levyn muodonmuutoksia ja mahdollisesti toimia myös samalla tukien liimana. Pinnoituksen täytyy olla myös mahdollisimman edullinen verrattuna sen ominaisuuksiin.

Nykyisissä tyhjiöeristeissä käytetään pintamateriaalina tyypillisesti 7-kerroslaminaattia, joka muodostaa nanopartikkeleiden ympärille kaasu- ja vesihöyrytiivin kuoren. Pinnoitteen ansiosta rakenteeseen ei tarvita mitään erillistä höyrynsulkumuovia tai tuulensuojalevyä. Sisemmän levyn pinta toimii rakenteen höyrynsulkuna ja ulompi levy tuulensuojalevynä. Tämä luonnollisesti pudottaa seinärakenteen kokonaiskustannuksia.[7.]

5.4 Järjestelmä

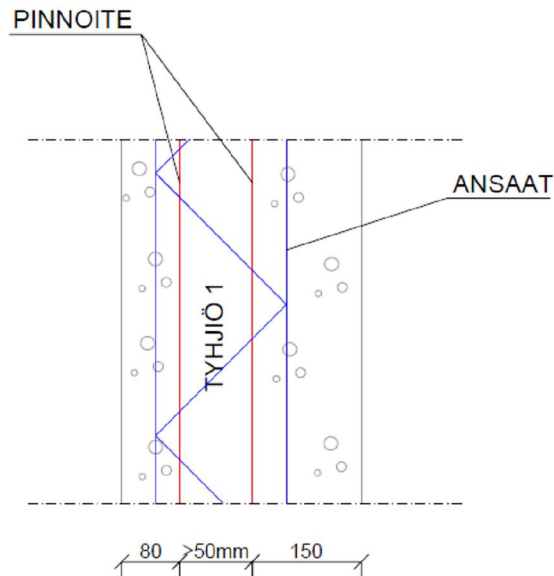
Järjestelmä koostuu pääosin kahdesta eri osasta, seinärakenteesta ja tyhjiöpumpusta. Seinärakenteena voi olla paneeleista koottu eristekerros tai elementtiin jo valmiiksi sisään rakennettu eristekerros.

Suurin osa rakenteiden tiiveyteen liittyvistä virheistä tehdään työmaalla. Hyvät suunnitelmat ovat sellaisia, joissa on minimoitu erehtymisen mahdollisuus työmaalla. Sama pätee rakennusmateriaaleihin ja tuotteisiin. Tuotteiden asentaminen tulisi olla helppoa ja yksiselitteistä. Virheille ei tule jättää tilaa.

Tämä aiheuttaa vaatimuksia rakennuksille. Rakenteiden täytyy olla mahdollisimman pitkälle tuotteistettuja. Harvoin on kuitenkaan sellaisia tilanteita, että rakennus voidaan kasata ns. tehdasolosuhteissa ja kuljettaa valmiina rakennuspaikalle. Elementtirakentaminen on kuitenkin nykyään erittäin yleistä. Käytännössä pientalot ovat ainoita rakennuksia, joita saatetaan rakentaa vielä alusta loppuun asti työmaalla. Pientalorakentaminen on kuitenkin erittäin suuri osa rakennusalaa ja mahdollisuus eristää myös pientaloja samalla tekniikalla on tärkeää.

Käytettäessä sandwich-elementtiä ei itse paneeleissa tarvitse olla samankaltaisia tukirakenteita kuin paikalla tehtävässä rakenteessa, jossa levyn täytyy itsessään kestää alipaineen aiheuttama kuorma. Tämä tekee rakenteesta erittäin edullisen, koska itse kuorirakenne toimii levyrakenteena. Eristekerroksen täytyy siis kestää ainoastaan valmistusvaiheessa aiheutuvan valupaineen. Betoni päästää jonkin verran kaasuja läpi ja ei todennäköisesti itsessään eristä tarpeeksi ulkopuolisten kaasujen pääsyä tyhjiökerrokseen.

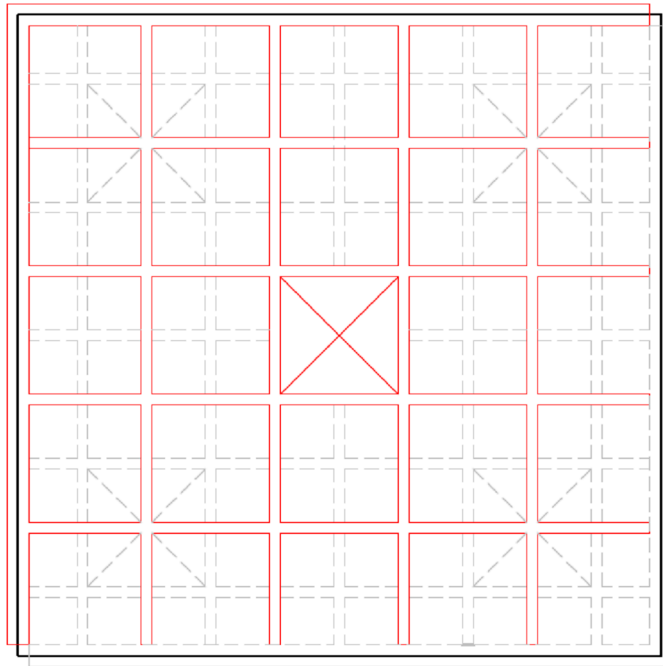
Paras vaihtoehto olisi valun aikainen muotti, jota voitaisiin käyttää uudestaan ilman, että levy tulisi jäämään elementin sisäpuolelle, jonka jälkeen betoni pinnoitettaisiin sisäpuolelta tai pinnoite olisi asennettu muotin pintaan jo valuvaiheessa, jolloin itse pinnoite jäisi suojattuun tilaan betonin sisäpuolelle.



Kuva 9. Betonisandwich-elementti

Pilari-/palkkirakenteissa kuten esim. puurunkoisissa rakennuksissa on omat haasteensa ja tällaisia rakenteita varten tulee olla oma tapansa toteuttaa tyhjiö. Tällöin tulee kyseeseen paneeleista rakennettu seinärakenne, joka mitoitettiin aikaisemmin työssä. Lopullinen rakennemalli muodostuu kun saadaan kaikki käytettävät materiaalit määritettyä.

Paneelit siis tulisi olla valmiiksi pinnoitettuja vanerilevyjä, joissa tukirakenne on valmiiksi paneelin sisällä. Kylmäsilat saadaan minimoitua asettamalla paneelin kaksi kerrosta jo valmistusvaiheessa limittäin toistensa päälle. Tällöin keskimmaiselle levyille aiheutuu myös jonkin verran taivutuskuormaa, koska tuet eivät ole samassa linjassa toistensa kanssa. Tämä ei kuitenkaan heikennä rakenteen toimintaa, joten paneeli kannattaa mahdollisesti toteuttaa tällä tavoin.



Kuva 10. Paneelin sisäisen rakenteen limitys

6 Kustannustehokkuus

Ainoa tapa saada sijoittajat ja rakentajat valitsemaan ja kehittämään tuotteita on todistaa tuotteen olevan kustannustehokkaampi kuin nykyisin markkinoilla olevat eristejärjestelmät. Tuotteen on siis toisin sanoen maksettava itsensä nopeammin takaisin kuin nykyään markkinoilla olevat eristysjärjestelmät.

Mitä vähemmän seinärakenne päästää lämpöenergiaa läpi, sitä enemmän rakenne säästää käyttäjän asumiskustannuksia. Rakenteen tulee kestää koko rakennuksen elinkaaren ajan ilman suuria huoltotoimenpiteitä. Rakenne ei voi aiheuttaa suoraan tai välillisesti käyttäjälle terveyshaittoja vaan ensisijaisesti estää niitä.

Kun järjestelmää kehitetään, tulee edellä mainitut asiat olla suunnittelun pohjana. Mitään rakennetta, jolla ei todistetusti pystytty säästämään käyttäjän kustannuksia ja samalla parantamaan rakenteen toimivuutta ei ole järkevää tuotteistaa ja tuoda markkinoille.

6.1 Eri rakennusmateriaalien kustannukset

6.1.1 Perinteiset eristemateriaalit

Tässä vertailussa käytetään internet lähteistä löytyneitä kuluttajahintoja eri materiaaleille. Käytetään normaaleja käytössä olevia seinärakenteita ja niihin kuluvia rakenneosia. Kustannustehokkuutta voidaan mitata kun huomioidaan seinärakenteen hinnan ja U-arvon suhdetta toisiinsa.

Seinärakenne 1	m2	hinta/m2	kok.hinta	
1.Ulkoverhous	1	11,5	11,5	
2.Koolaus48x48 k600	1	1,28	1,28	
3.AL-levy 0,5mm	0	6,86	0	
4.AL-paperi	10	0,664	6,64	
4.PEL 0,2mm	10	0,71	7,1	
5.Havuvaneri 15mm	2	9,46	18,92	
6.Havuvaneri 15mm	1	9,46	9,46	
7.Koolaus 48x98 k600	1	2,9	2,9	
8. Gyproc 13mm	1	3,81	3,81	
		yht.	61,61	€/m2
Hinta * U-arvo			3,175955	€/(W/m ² K)

Seinärakenne 2	m2	hinta/m2	kok.hinta	
1.Ulkoverhous	1	11,5	11,5	
2.Koolaus 48x48 k600	1	1,28	1,28	
3.Gyproc 9mm	1	4,07	4,07	
4.Min.villa (250mm)	1	14,725	14,725	
5.Koolaus 48x198 k600	1	6	6	
6.PEL 0,2mm	1,25	0,71	0,8875	
7.Koolaus 48x48	1	1,28	1,28	
8.Gyproc 13mm	1	3,81	3,81	
		yht.	43,5525	€/m2
Hinta * U-arvo			6,436245	€/(W/m ² K)

Kuva 11. Seinärakenteen hinnan suhde saavutettavaan U-arvoon

Työn hintaa ei tässä vertailussa ole huomioitu.

Vertailusta voidaan päätellä, että tyhjiörakenne pystyy kilpailemaan hyvin perinteisten eristysratkaisujen kanssa. Kuitenkin tyhjiön U-arvo on aivan liian hyvä verrattuna nykyisiin rakennusmääräyksiin eikä täten välttämättä mielekäs vaihtoehto kun halutaan rakentaa normaalivaatimusten mukaisia rakennuksia. Kuitenkin passiivi- ja nolla-energia taloissa tyhjiöeristys voi nousta huomattavastikin edullisemmaksi ratkaisuksi.

7 Rakenteen koestus

7.1 Koestuksen järjestely

Koestus järjestettiin Metropolian AMK:n laboratoriotiloissa. Koestuksessa käytettävään kalustoon kuului tyhjiöpumppu, painemittari, venttiili ja koekappale liitososineen.

7.2 Koestuksen tavoite

Koestuksessa oli tarkoitus selvittää ensisijaisesti, miten puu materiaalina toimii tyhjiörakenteessa. Toisena tavoitteena oli testata, kuinka hyvin asennettu pinnoitus estää paineen tasautumisen rakenteen läpi.

7.3 Rakenne

Koestuskappaleena käytettiin 1mx1mx0,1m suuruista +laatikkoa+, johon rakennettiin sisään 1-kerroksinen tukirakenne.



Kuva 12. Tukirakenne

Ulkokehänä kiertää 48x98 puurunko, tukina toimivat 15 mm vahvuiset havuvanerit, joihin porattiin halkaisijaltaan 50 mm kokoiset reiät 100 mm välein, jotta tyhjiö saadaan imettyä mahdollisimman helposti koko rakenteen sisään yhdellä kerralla. Levyrakenteeksi valittiin myös 15 mm vahvuinen havuvaneri.

Rakenne liimattiin yhteen käyttämällä Bentex-merkkistä liima- ja tiivistemassaa. Liimauksen puristus tehtiin ruuvaamalla vaneri kehikkoon kiinni. Tämän jälkeen sauma- ja epäjatkuvuuskohtat teipattiin alumiiniteipillä umpeen, jotta alipaineen aiheuttama kuormitus ei pääse rikkomaan pinnoitusmateriaalia.



Kuva 13. Epäjatkuvuuskohtien paikkaus

Rakenne pinnoitettiin kuten nykyiset tyhjiöeristeet, vuorotellen alumiinipaperilla ja 0,2 mm vahvuisella PEL-muovilla. Kerroksia asennettiin yhteensä 5 kpl (3xAL ja 2xPEL). Joka kerroksessa saumakohdat teipattiin erikseen umpeen. Nykyisissä tyhjiöeristeissä olisi ollut vielä yksi kerros kumpaakin pinnoitetta. Kokeessa ei kuitenkaan ollut tarkoitus saada mahdollisimman hyvää ilmanvuotolukua vaan ensisijaisesti testata puurakenteen toimintaa tyhjiössä.

7.4 Koejärjestely ja päätelmät

Kokeessa pinnoitettuun rakenteeseen porattiin halkaisijaltaan 13 mm:n reikä, johon liimattiin kaksikomponenttiliimalla kiinni kierrelitiin. Liittimeen kiinnitettiin tyhjiöpumpulta tuleva letku.



Kuva 14. Rakenteeseen asennettu liitin

Tämän jälkeen tyhjiöpumpun annettiin imeä täydellä teholla noin 6 minuutin ajan kunnes tyhjiöpumpun painemittari ei enää liikkunut noin minuuttiin. Sen jälkeen venttiili suljettiin ja tyhjiöpumpusta katkaistiin virta.

Kuulohavainnoilla tarkasteltiin, löytyykö rakenteessa vuotokohtia. Kuulohavaintojen ja painemittarin lukeman perusteella todettiin, että liitoskohdassa on huomattava vuoto eikä täten pinnoituksen läpäisevän kaasun määrä voida millään tavoin luotettavasti määrittää. Tulevaisuudessa tehtävissä testauksissa liitin tulisi siis asentaa rakenteeseen jo kokoamisvaiheessa, jotta liittimen ja pinnoitusten välinen tiivistys saataisiin toimimaan halutulla tavalla.

Rakenteen sisäinen paine nousi vuodon takia noin 20 000 Pascaliin viiden minuutin kuluttua tyhjiöpumpun sulkemisen jälkeen. Lyhytaikaisesti ei itse rakenteessa havaittu muodonmuutoksia paitsi pinnoitteen painautuminen kiinni tukirakenteeseen tilojen paine-eron kasvaessa. Sen perusteella voidaan päätellä, että hetkellisellä kuormituksella puurakenne toimii tyhjiössä oletetulla tavalla.

Tyhjiöpumppu päätettiin jättää päälle noin yhden vuorokauden ajaksi, jotta huomataan, tapahtuuko rakenteessa haitallisia muodonmuutoksia kun puiden huokosissa olevaa kaasua saadaan poistettua rakenteesta. Rakenteeseen ei muodostunut minkäänlaisia muodonmuutoksia koko koestuksen aikana, jonka perusteella voitiin päätellä rakenteen toimivan oletetulla tavalla. Tyhjiön pysyvyyttä ei päästy vuotojen takia koestuksessa toteamaan. Jatkotesteissä todettiin myös ilmanpainemittarin tai itse tyhjiöpumpun venttiilin aiheuttavan vuotoa järjestelmään, jonka vuoksi luotettavien tulosten saaminen ilmapuodon määrästä oli käytännössä mahdotonta.

Koestukseen valmistettiin vielä toinen koekappale 9 mm vanerilevyllä. Tässäkään kappaleessa ei huomattu minkäänlaisia mekaanisia muodonmuutoksia kantavassa rakenteessa. Toiseen koekappaleeseen oli valmiiksi tiivistetty liitin, joka tiivistettiin vielä erikseen teipillä kiinni jokaiseen pinnoitekerrokseen. Tästä huolimatta rakenteen sisälle pääsi kerääntymään kaasuja joko vaurioituneen tai huonosti tiivistetyn pinnoitteen läpi, liittimen liitoskohdasta tai itse pinnoitteen sisälle jäävästä materiaalista. Jos kyseessä oli pinnoitteen sisälle jäävästä materiaalista vapautuvaa kaasua, tulisi tyhjiö pumpata useaan otteeseen pidemmällä aikavälillä luotettavien tulosten saamiseksi.



Kuva 15. Koekappale 2:n liitin

Jatkotestissä todettiin myös pinnoitteen toimivuus. Alumiiniputkeen porattiin kolme halkaisijaltaan 1 cm kokoista reikää. Putki kierrettiin tiiviisti kiinni järjestelmään, jonka jälkeen reiät peitettiin lisäämällä vuorotellen kerros alumiiniteippiä ja höyrynsulkuteippiä. Jo kahden alumiini- ja yhden höyrynsulkuteippikerroksen jälkeen paineen tasautuminen järjestelmässä muuttui lähes vakioksi 4 min 50 s kohdalle huolimatta siitä kuinka monta kerrosta teippiä lisättiin. Voitiin siis todeta, että järjestelmän aiheuttama vuoto tai pinnoitteesta vapautuvan kaasun määrä oli jo kolmen pinnoituskerroksen jälkeen huomattavasti suurempi kuin pinnoitteen kaasun läpäisevyys.



Kuva 16. Pinnoitteen ja laitteiston testikappale

7.5 Johtopäätöksen koestuksesta

7.5.1 Eristeen sisäinen runkorakenne

Koestuksen jälkeen voitiin todeta mekaanisen rakenteen toimineen oletetulla tavalla. Tulevaisuuden testeissä olisi syytä käyttää myös pistemäisiä tukirakenteita niiden pienemmän lämmönjohtavuuden vuoksi.

Kaksikerrosrakennetta ei koestukseen valmistettu, koska tarkoituksena ei ollut mitata rakenteen lämmönjohtavuuskykyä vaan kappaleen rakenteellista toimivuutta.

Nykyisissä eristeissä käytettävät nanomittaluokan hiilipartikkelit estävät jonkin verran säteilyn etenemistä eristeen läpi. Alumiinipinnoitteen on kuitenkin todettu toimivan erittäin hyvänä säteilyenergian heijastajana. En itse näe ensisijaisen tarpeelliseksi tässä tapauksessa suuresti eristekerroksen kustannuksia kasvattavan materiaalin lisäämistä eristekerroksen sisäpuolelle, jos sillä ei saavuteta huomattavia hyötyjä eristyskyvylle.

7.5.2 Pinnoitus

Itse pinnoitusmateriaali voidaan koestuksen perusteella todeta toimivaksi. Tämä olikin käytännössä jo tiedossa nykyisten tyhjiöeristeiden pinnoitustapojen vuoksi.

Pinnoituksen asennustapa voidaan kuitenkin todeta huonoksi vaihtoehdoksi mahdollisten työvirheiden vuoksi. Pinnoitteen kiinnitystapa teippaamalla ei ole yhtä luotettava kuin esimerkiksi hitsaaminen tai vaihtoehtoisesti ruiskulla levitettävä pinnoite. Myös pinnoitteen sijainti rakenteen ulkopinnassa asettaa sen helposti alttiiksi asennuksen aikaisille vaurioille.

Toisena syynä on pinnoituksen sisälle jäävästä materiaalista haihtuva kaasu tyhjiöön. Tämä heikentää pintojen väliin jäävän osan eristyskykyä. Käytännössä se tarkoittaa sitä, että tyhjiö täytyy pumpata useamman kerran ennen kuin saadaan eristyksen kannalta tarvittavan pieni määrä kaasua pintojen väliin stabiiliin tilaan. Eristyksen kannalta

tavoiteltava paine on nykyisissä tyhjiöeristeissä noin 5 mbar eli 5/1000 ilmakehän paineesta, jonka jälkeen eristyskyky ei enää nykyisillä tyhjiöeristeillä juurikaan parane.

Tämä ei suoranaisesti tarkoita, että tyhjässä ontelossa olisi yhtä hyvä eristävyysarvo kun nykyisissä tyhjiöeristeissä. Kuten aikaisemmin mainittiin, on nykyisissä tyhjiöeristeissä käytetty nanopartikkeleita, jotka osaltaan estävät kaasujen vapaata liikkumista eristekerroksessa. Rakenteen ei siis voida olettaa toimivan samalla tavoin kun nykyiset tyhjiöeristeet vaan sille täytyy suorittaa omat lambda-arvomittauksensa eri kaasumäärien vallitessa kerroksen sisällä.

8 Päätelmät

8.1 Levyrakenne

Lopulliseksi levyrakenteeksi valikoitui koestuksen perusteella 9 mm vahvuinen havuvarneri tai PVC-levy niiden samankaltaisten lujuusominaisuuksien ansiosta. Levy kestää hyvin rakenteelle tulevan kuormituksen ilman haitallisia muodonmuutoksia käytettäessä noin 100...150 mm tukiväliä. Kirkkaan PVC:n käyttö mahdollistaa saman rakennemallin käytön läpinäkyvissä rakenteissa kuten ikkuna-aukoissa.

8.2 Tuet

Lopulliseksi tukimateriaaliksi tulee valikoituitumaan puu tai jäykkä PVC-muovi pistemäisenä tukirakenteena. Tukipinta-alana käytetään aikaisemmin laskettua levyn läpileikkauskestävyyteen perustuvaa tukipinta-alaa. Näissä testeissä ei käytetty kuin jatkuvia puurakenteisia tukirakenteita, koska muoviset pistemäiset tuet tulisi joka tapauksessa olla tehdasvalmisteisia, joka olisi aiheuttanut kustannusten ja aikataulun venymistä ilman yhteistyökumppania.

8.3 Pinnoitus

Pinnoitusmateriaalina alumiini-PEL-pinnoitus kerroksittain. Pinnoitteen sijainti tulisi olla levyrakenteen sisäpuolella asennusaikaisten vaurioiden ehkäisemiseksi. Pinnoitukses-

sa tulee huomioida myös lämpötilavaihteluiden vaikutus pinnoitus ja tiivistysmateriaaleihin. Varsinkin tiivistykseen käytettävien massojen tulee kestää pakkasta ja kuumuutta menettämättä elastisuuttaan. Tähän käyttötarkoitukseen hyviä esimerkkejä ovat epoksipohjaiset kosteuskovettuvat saumausaineet, jotka reagoivat kosteuden kanssa suoja-ten näin saumaan jäävää elastista tiivistysmassaa ulkoisilta rasitteilta.

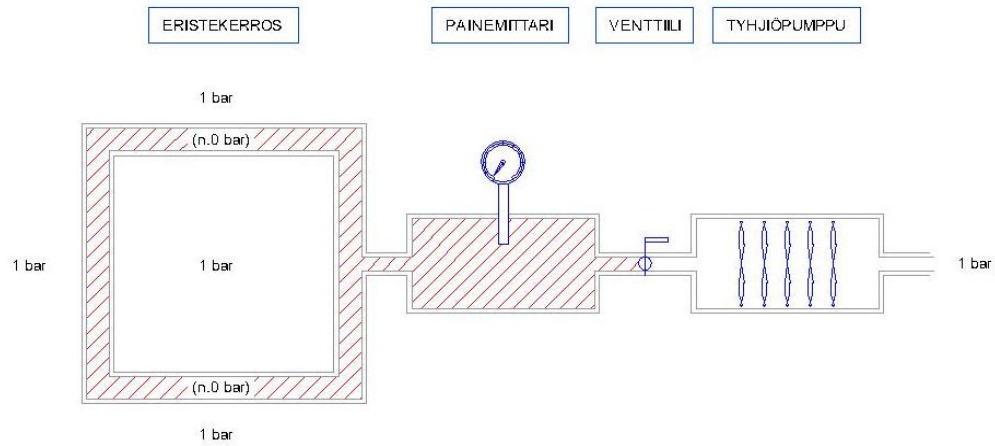
8.4 Järjestelmä

Eristysjärjestelmän toiminta perustuu rakennuksen kokonaisvaltaiseen tiiveyteen ja jatkuvuuteen. Järjestelmään on mahdollista yhdistää alapohja-, seinä-, yläpohja- ja ikkunarakenteet. Käytännössä kaikkien rakennuksen kiinteiden osien tulisi olla osa lopullista eristysjärjestelmää. Ovia tai aukaistavia ikkuna-aukkoja ei pystytä tiivistämään ilman, että siitä olisi haittaa eristekerroksen toiminnalle.

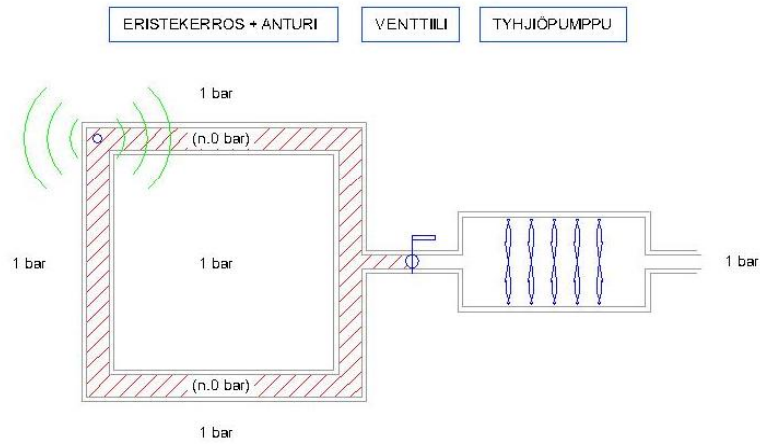
Rakennukseen kohdistuvat ulkoiset ja staattiset kuormat aiheuttavat rakennukseen myös aina jonkin verran painumaa ja kiertymää. Ilman elastisia liikuntasauvoja rakenteeseen aiheutuu väistämättä saumojen halkeilua ja sitä kautta tyhjiön sekä eristyskyvyn menetys.

Jos eristyskykyä halutaan säädellä mm. rakennuksen jäähtymisen takia, olisi järjestelmä mahdollisesti järkevää jakaa myös erillisiin lohkoihin esimerkiksi asunto- tai toimitalakohtaisesti. Tämä aiheuttaa järjestelmään useamman liitoskohdan ja sitä kautta kasvattaa riskiä menettää järjestelmän kustannustehokkuus. Todennäköisesti jokin muu jäähtytystapa kuten maakylmä tulisi joka tapauksessa kustannustehokkaimmaksi ratkaisuksi, koska kaasumäärän säätely pintojen välissä on hidasta, jonka takia seinän eristyskyvyn tarve eri tilanteissa tulisi pystyä myös etukäteen ennakoimaan.

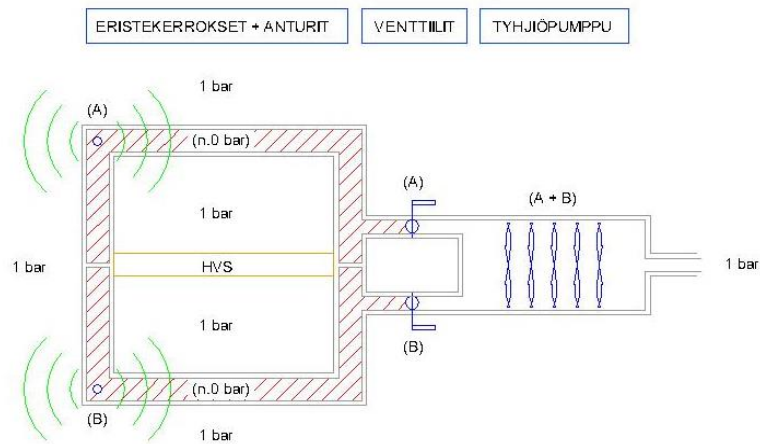
JÄRJESTELMÄ (1)



JÄRJESTELMÄ (2)



JÄRJESTELMÄ (3)



Kuva 17. Periaatekuva järjestelmästä

9 Tarvittavat suunnitelmat

9.1 Rakennesuunnitelmat

Rakennesuunnitelmista tarvitaan liitosdetaljit, jotka käsittävät yläpohja-, alapohja-, välipohja-, parveke-, väliseinä-, ovi- ja ikkunaliitokset.

9.2 LVI-suunnitelmat

LVI-suunnitelmiin tulee sisällyttää järjestelmä, joka sisältää kaasumäärää mittaavan laitteen sekä siihen yhdistetyn tyhjiöpumpun, joka säätelee haluttua kaasumäärää eristekerroksessa. Haluttu kaasumäärä pystytään määrittämään siis joko yhteen pisteeseen, vuodenaikojen mukaan, käyttötarkoituksen mukaan tai reaaliaikaisesti esimerkiksi ulkolämpötilan ja sisälämpötilan eroon mukautuen.

9.3 Valmistusohjeet

Valmistusohjeen sisältävät paneelin ja elementin rakennemallit, materiaalit ja valmistavat. Erityisosat kuten ikkuna- ja ovikiinnikkeet sekä eri liitoskohtiin kuten ala-, väli- ja yläpohjaan mahdollisesti tarvittavat rakenteen/elementit eristekerroksen yhtenäisyyden mahdollistavat osat.

9.4 Asennusohjeet

Asennusohjeet sisältävät elementtien ja paneelien käsittelyn, nostot, kiinnitykset sekä saumojen tiivistyksen.

Sandwich-elementtien asennus ei juurikaan eroa nykyisestä. Saumoissa elastinen tiivistysmassa tai tiivistysnauha asennetaan jo elementtien asennusvaiheessa, jolloin saadaan käytettyä hyödyksi elementin omaa painoa massan tiivistämisessä pintoja vasten. Tämä voi kuitenkin hidastaa elementtien asennusta, mikä taas tarkoittaa kustannuksia rakentajalle.

Saumojen tiiveyden varmistamiseksi on kehitetty yksinkertainen toteutustapa joka jätetään tämän työn ulkopuolelle siihen liittyvien patentoitavien osien vuoksi.

9.5 Huoltosuunnitelma

Rakennuksia ja rakenteita on pystyttävä aina huoltamaan. Tähän täytyy kehittää myös toimiva ja yksinkertainen ratkaisu, joka ei vaikuta rakennuksen huollonaikaiseen käytettävyyteen käyttäjän näkökulmasta.

Betonielementeissä tiivisteiden saumojen vuotokohtia paikannetaan lämpökamerakuvauksilla. Tyhjiöeristeen toimintaa voidaan mitata täysin samalla periaatteella. Normaalisti rakennukseen tuotetaan ylipaine sisätilaan, jolloin pystytään lämpökameralla kuvaamaan kylmän ilman virtausta ulkoa sisäänpäin. Tyhjiötilaan voidaan samalla tavoin tuottaa ylipaine, jolloin saumoissa olevat vuotokohdat pystytään paikantamaan ulos virtaavan kylmemmän tai lämpimämmän ilman perusteella.

Lämpökamerakuvauksia suoritetaan nykyisin useimmiten talvisin, jolloin vuotokohdat pystytään paikallistamaan helpommin, koska sisällä ja ulkona on tällöin normaalisti suurempi lämpötilaero eikä sitä tarvitse erikseen tuottaa mittauksia varten.

10 Johtopäätökset

Teoriatasolla ratkaisu on toimiva. Kuitenkaan työn haluttuun lopputulokseen eli toimivaan ja kustannustehokkaaseen eristystapaan ei mielestäni vielä tässä vaiheessa ole päästy ainakaan puurakenteisen rakennuksen osalta. Järjestelmässä on tällöin niin monta muuttujaa ja eri toteutustapaa, että parhaiden ratkaisujen löytäminen ei tule tapahtumaan yhdellä kertaa vaan ajan, testausten, kehitystyön ja kokemuksen kautta kuten voidaan varmasti useimmiten todeta kehitettäessä uusia järjestelmiä.

Tässäkin työssä tehdyt ratkaisut ja päätelmät perustuvat jo olemassa oleviin tapoihin toteuttaa tyhjiö. Työn tehtävänä on mielestäni ollut tyhjiöeristämisen ohjaaminen toimivaksi ja kustannustehokkaaksi rakenteelliseksi ratkaisuksi. Uskoisin, että betonisandwich-elementeissä toimiva ratkaisu tämän tekniikan hyödyntämiseen on jo tässä työssä pääpiirteittään löytynytkin. Sandwich-elementeissä ongelmaksi muodostuu ansasteräs-

ten aiheuttamat kylmäsilat, joiden vaikutus kasvaa prosentuaalisesti sitä mukaa kun eristekerroksen lämmöneristyskyky paranee.

Suurimmat muuttujat tulevat mitä todennäköisimmin olemaan eristyskerroksen ja pinnoituksen kerrosvahvuudet. Pinnoitteen vahvuus tarkoittaa käytännössä sitä, kuinka paljon kaasua pinta päästää eristetilaan. Nykyisten tyhjiöeristeiden käyttöikä on noin 20 vuotta. Tyhjiöeristeen osuus eristyskyvystä menetetään kun eristeen sisään pääsee ajan myötä vapautumaan kaasuja. Tämän vuoksi nykyisiä tyhjiöeristeitä ei voida käyttää rakenteen pääsääntöisenä eristysmateriaalina. Eli pinnoituskerroksen optimointi perustuu siihen joudutaanko tyhjiötä säätämään pumpun avulla esimerkiksi kerran päivässä, viikossa, kuukaudessa, vuodessa vai vuosikymmenessä. On huomioitava myös pinnoituksen valmistukseen käytettyjen materiaalien kustannukset ja niiden valmistuksesta mahdollisesti aiheutuvien päästöjen määrä sekä kierrätysmahdollisuudet.

Paras puoli pintojen avulla eristämisessä on mielestäni se, että näin saadaan rakentajat panostamaan rakentamisen laatuun. Järjestelmä pakottaa toteuttajan keskittymään rakenteiden tiiveyteen liittyviin yksityiskohtiin, koska työn jälki pystytään helposti mitaamaan ja korjaamaan paikan päällä ennen rakennuksen luovutusta loppukäyttäjälle. Nykyisin rakennuksen lopputiiveys usein on, mitä on ja sille ei enää tehdä juuri mitään sen jälkeen kun rakennus on pystyssä. Eristettäessä pintojen avulla asia on korjattava, koska ilman rakenteiden tiiveyttä seinärakenteen U-arvo putoaa täysin mitättömäksi. Jos tiiveyttä ei saada toteutumaan joudutaan turvautumaan vaihtoehtoiseen ratkaisuun eli täyttämään seinärakenne esimerkiksi puhallusvillalla, jotta päästään vaatimusten mukaiseen U-arvoon. Se voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että rakennuksen luokitus putoaa nollaenergialuokasta tavanomaiseen rakennukseen. Tämä taas heijastuu suoraan asuntojen myyntihintaan, jolloin rakennusliike +häviää+ rahaa työn huonosta laadusta johtuen.

Jos pintojen avulla eristäminen saadaan todistetusti yhtä kustannustehokkaaksi ratkaisuksi kuin perinteiset eristystavat en näe mitään syytä miksi se ei voisi olla erittäinkin vartenotettava vaihtoehto rakentajille, myös silloin kun ei olla lähtökohtaisesti rakentamassa nolla- tai plusenergiataloja. Materiaalikustannukset ovat erittäin kilpailukykyisiä ja valmistustavat eivät olennaisesti eroa jo markkinoilla olevista ratkaisuista. Eristekerroksen paksuuskin voi olla lähestulkoon mitä tahansa 0,02 m – 0,5 m välillä riippuen käytetystä tukirakenteesta ilman, että rakenteen valmistuskustannukset juurikaan muuttuvat. Kuitenkin noin 0,1 m paksuisella eristekerroksella saavutetaan rakenteessa

jo niin hyvä U-arvo, ettei juuri sitä vahvempia eristekerroksia ole mielestäni mielekästä edes tällä hetkellä tavanomaisissa kohteissa toteuttaa, ellei samanaikaisesti kiinnitetä erityistä huomiota myös talotekniikan aiheuttamaan lämpöhukkaan.

Lähteet

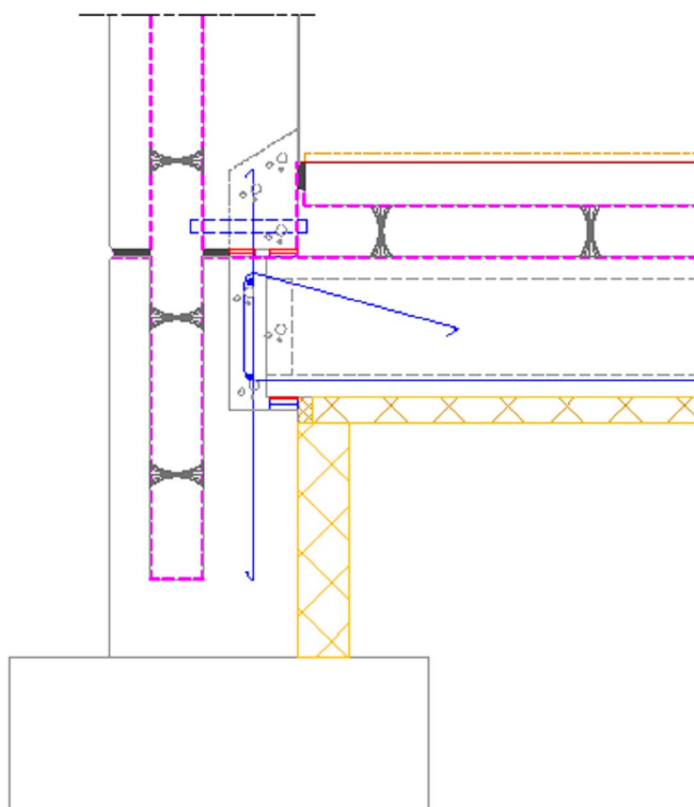
- 1 Puuinfo Oy:n kotisivut, <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnitte-lu/eurokoodi5lyhennettysuunnitteluohjewwwkolmaspainos10913rilinkorjauksin.pdf>, luettu 24.4.2015
- 2 Oikeusministeriön aineiston internet-palvelu (lämmöneristys), <http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>, luettu 24.4.2015
- 3 Finnfoam Oy:n kotisivut, <http://www.finnfoam.fi/finnfoam-eristelevyt/ominaisuudet/>, luettu 24.4.2015
- 4 Puuinfo Oy:n kotisivut, <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/puuinfon-julkaisut-kuluttajille/hyvatietaalampopuusta.pdf>, luettu 24.4.2015
- 5 Oy Fluorotech Ltd:n kotisivut, <http://www.fluorotech.fi/files/mittakuvat/Teknisetmuovit.pdf>, luettu 24.4.2015
- 6 Vicover Oy:n kotisivut, <http://www.vicover.fi/teknologia/kuumaa-lampooppia-huippuluokan-eristyskykyyn>, luettu 24.4.2015
- 7 Oikeusministeriön aineiston internet-palvelu (rakennusten energiatehokkuus), http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf, luettu 24.4.2015
- 8 Mineraalivilla, <https://www.byggmax.fi/eristeet/mineraalivillat>, luettu 24.4.2015
- 9 Ekovilla, Ekovilla Oy:n kotisivut, <http://www.ekovilla.com/>, luettu 24.4.2015
- 10 EPS-eriste, <http://www.taloon.com/kuvat/tk/Kuvia/styrox.jpg>, luettu 24.4.2015
- 11 Tyhjiöeriste, http://www.energianerokas.fi/components/com_virtuemarket/shop_image/product/Vacupor_XPS_B2_4ca1aacc4ee3a.jpg
- 12 Tyhjiöeriste, http://www.energianerokas.fi/components/com_virtuemarket/shop_image/product/Vacupor_TS_B2_4ca1ac5e21484.jpg,

- 13 Aerogel,
http://www.energianerokas.fi/components/com_virtuemart/shop_image/product/Aerogel_tilke_4f6c6b8a81db8.jpg
- 14 Lämpökameran kuva, http://www.entec.fi/MyImages/lampokuvaus_esim1.jpg
- 15 Konvektio eristeessä, http://www.tiivistalo.fi/images/kv_konvektio_05.gif
- 16 Puun sisäinen rakenne,
http://www.puuproffa.fi/proffin/images/stories/metsa/_soluseinanrakenne.jpg
- 17 SPU-eristeet, <http://www.spu.fi/tuotteet/> , luettu 24.4.2015

Sandwich-elementtirakenteet

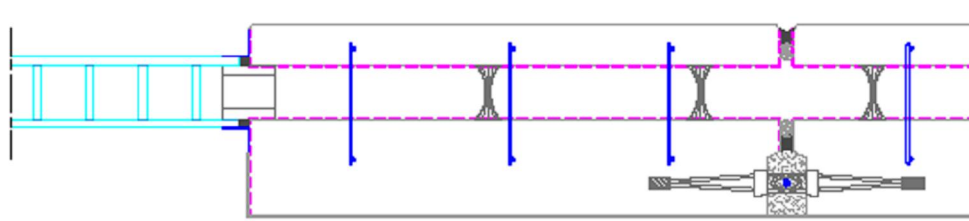
Malliliitosdetaljeja Sandwich-elementtirakenteesta

SANDWICH-ELEMENTTI (KANTAVA; LIITOSDETALJI ALAPOHJA)

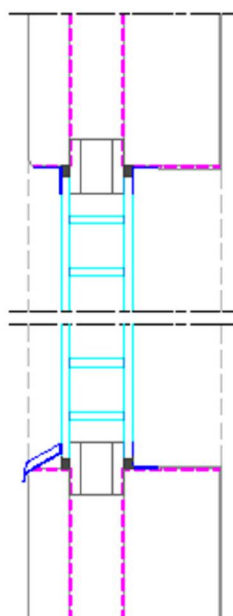


SANDWICH-ELEMENTTI

(KANTAVA; IKKUNA JA PYSTYSAUMA)



ULKOPUOLEN
SAUMOISSA
KOSTEUSKOVETTUVA
ELASTINEN
TIIVISTYSMASSA



SISÄPUOLEN
SAUMOISSA
ELASTINEN
TIIVISTYSMASSA

SANDWICH-ELEMENTTI

(KANTAVA; LIITOSDETALJIT YLÄ- JA VÄLIPOHJA)

ULKOPUOLEN
SAUMOISSA
KOSTEUSKOVETTUVA
ELASTINEN
TIIVISTYSMASSA

SISÄPUOLEN
SAUMOISSA
ELASTINEN
TIIVISTYSMASSA

